

**В.А.ЖОВДАК**, докт.техн. наук; **С.В.КРАСНИКОВ**, канд.техн.наук;  
**А.С.СТЕПЧЕНКО**, канд.техн.наук; **А.В.ТОРЯНИК**; НТУ «ХПИ»

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНДАМЕНТА ДЛЯ МНОГОКОРПУСНОГО ТУРБОАГРЕГАТА**

Розглядається стержнева модель фундаменту для багатокорпусного турбоагрегату АЕС. Запропоновано декілька нестандартних методів моделювання ригелів з обліком багатоопорного спираання корпусів. Розраховуються власні частоти і форми коливань конструкції і підтверджується адекватність використаних методів для ефективного моделювання фундаменту в системі турбоагрегат-фундамент-основа.

A beam model of base for multi-case turbine NES is under consideration. A few non-standard methods of modeling crossbars to accommodate multi-point support of turbo set cases are proposed. On the base of calculated natural frequencies and forms the adequateness of used methods for seating effective modeling in turbine base foundation system is confirmed.

**1. Введение.** Современные турбоагрегаты представляют крупногабаритные высоконадежные установки длительного срока эксплуатации, работающие в условиях значительных статических и динамических нагрузок. Проблемы надежности и возможность разрушения таких сооружений порождают ряд рисков, связанных с большими экономическими, экологическими и людскими жертвами. Фундамент турбоагрегата является первичным звеном, на которое возлагается ответственность за поддержание стабильной работы турбоустановки, а также обеспечение демпфирования колебаний и взаимосвязь корпусов и других компонентов системы в единое целое. Поэтому для проведения исследования колебаний корпусных элементов системы особенно важной проблемой является построение достоверной модели фундамента.

Ранее были проведены исследования [1-3], которые подтвердили целесообразность моделирования фундамента турбоагрегата в виде стержневой системы. Исследования проводились для турбоагрегатов малой и средней мощности с одним корпусом. Сравнение результатов исследований с экспериментальными данными подтвердили, что стержневая модель обеспечивает высокую точность результатов расчетов вынужденных колебаний фундамента и опор роторов.

Фундаменты под турбоагрегаты большой мощности имеют существенные отличия, обусловленные наличием нескольких корпусов, опирающихся на один и тот же балочный элемент, что вносит сложности при использовании стержневых моделей для моделирования системы турбоагрегат-фундамент-основание (ТФО). В связи с указанной особенностью построение адекватной модели фундамента турбоагрегата большой мощности является актуальной задачей.

**2. Постановка задачи.** Целью работы является построение адекватной модели фундамента для многокорпусного турбоагрегата АЭС. Особенностью этой модели является опирание двух корпусов на один ригель. Предлагается рассмотреть гибридные пластинчато-стержневые модели опорного ригеля, имеющие одинаковые с ним моменты инерции и площади поперечного сечения.

**3. Описание конструкции системы K500 и его фундамента.** Многокорпусный турбоагрегат K500 представляет сложную систему из 5 корпусов-цилиндров, состоящих из одного ЦВД, четырех ЦНД и генератора (рис. 1). Ротора турбины и генератора соосны и объединены в единый валопровод, проходящий вдоль оси фундамента. Каждый из корпусов турбоагрегата крепится на фундаменте.



Рисунок 1 – Общий вид турбины K-500-65/3000, вид со стороны генератора

Фундамент турбоагрегата представляет железобетонную балочную конструкцию с плитой под корпусом генератора и играет роль основания для корпусов и обуславливает взаимосвязанные колебания данных объектов. Геометрия фундамента симметрична относительно вертикальной плоскости, проходящей через линию оси ротора. Рамный фундамент состоит из набора ригелей, на которые опираются элементы турбоагрегата, и колонн, каждая из которых забетонирована в бетонное основание. Пять секций фундамента расположены под корпусами цилиндров турбины, еще 3 секции – под корпусом генератора и его возбудителя. Последняя крайняя секция укреплена горизонтальной плитой под корпусом возбудителя генератора.

**4. Построение базовой модели фундамента.** В качестве базовой модели фундамента турбоагрегата используется стержневая модель, в которой все ригеля смоделированы балочными конечными элементами. Достоверность такой модели доказана в работах [2-4]. На рис. 2 представлена расчетная схема для базовой стержневой модели фундамента турбоагрегата K500.

Поскольку фундамент имеет плоскость симметрии, была построена модель симметричной части с соответствующими граничными условиями по плоскости симметрии. Все колонны имеют жесткое защемление.

В КЭ моделях использовались пространственно деформируемый двух узловой стержневой КЭ и четырех узловой пластинчатый КЭ с шестью степенями свободы в узле. Для подбора оптимального КЭ разбиения базовой модели фундамента были построены 2 стержневые модели фундамента с различной

дискретизацией (табл. 1).

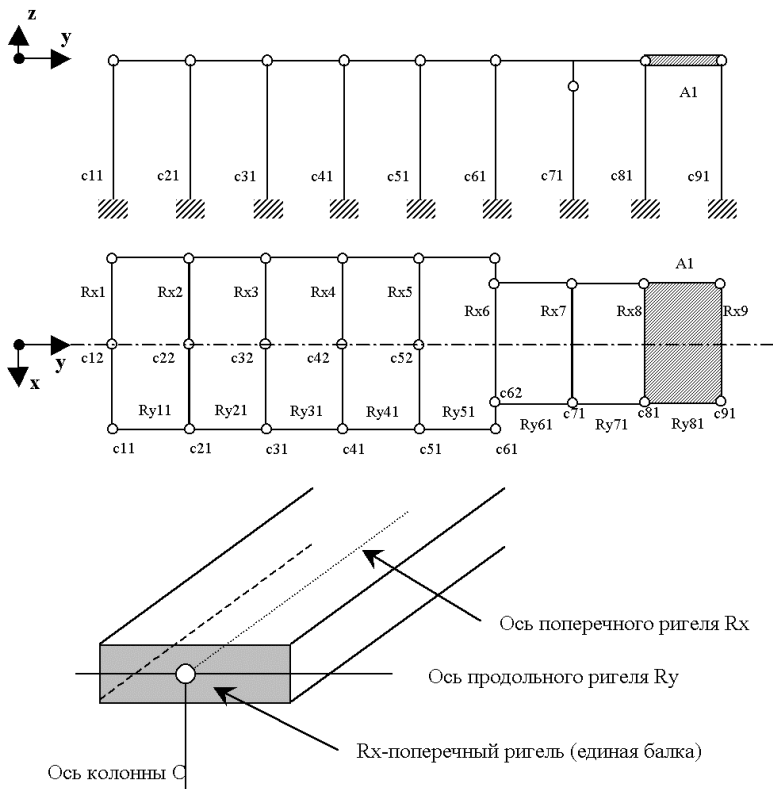


Рисунок 2 – Стержневая модель фундамента парового турбоагрегата К-500

Таблица 1 – Стержневые модели различной КЭ дискретизации

№ модели	Количество		
	КЭ	узлов	Степеней свободы
1	1694	1615	8757
2	5735	5540	31086

Для моделей 1 и 2 проведены расчеты собственных частот и форм. По результатам расчетов погрешности определения собственных частот в диапазоне 0...60 Гц следующие: максимальная относительная – 0.018 % на частоте 52,4 Гц, максимальная абсолютная – 0,037 Гц на частоте 33,8 Гц. Оценка погрешностей показала достаточность конечно-элементной дискретизации модели 1, которая и выбрана в качестве базовой.

Таким образом, данная модель адекватно описывает исходную конструкцию с точки зрения геометрии, но не предоставляет возможности моделировать опирание нескольких корпусов на один стержневой ригель. Необходимо

построить стержневую модель, которая позволяет проводить динамические расчеты системы ТФО с многокорпусным опиранием.

**5. Построение эффективной модели фундамента для многокорпусного турбоагрегата.** Критерием эффективности модели фундамента для многокорпусного турбоагрегата являются адекватность описания геометрии и динамических характеристик фундамента, а также возможность моделирования опирания двух корпусов ЦНД на смежные балочные элементы.

Для удовлетворения этих требований, были предложены следующие способы моделирования ригелей, на которые опираются два корпуса цилиндра низкого давления турбоагрегата:

**Способ 1.** Моделирование ригеля двумя параллельно расположенными балочными элементами (оси совпадают с линией опирания полок корпусов ЦНД) соединенных пластиной. Ошибка данного способа состоит в несоответствии толщины предельным соотношениям теории пластин. Модель приведена на рис. 3.

**Способ 2.** Моделирование ригеля единой пластиной соответствующей ширины и толщины. Ошибка данного способа состоит в несоответствии толщины предельным соотношениям теории пластин. Модель приведена на рис. 4.

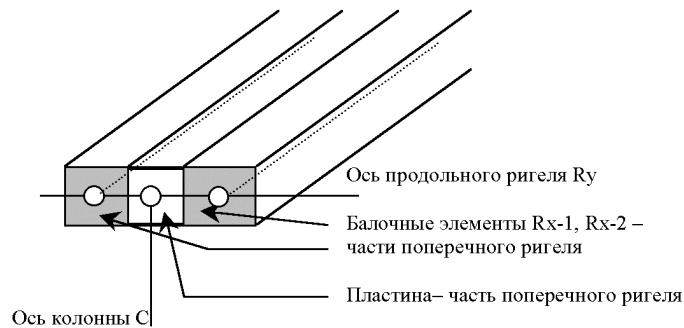


Рисунок 3 – Моделирование ригеля двумя балочными элементами, соединенными пластиной

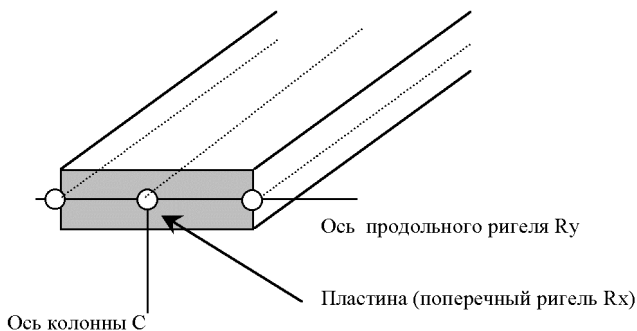


Рисунок 4 – Моделирование ригеля пластинчатым элементом

**Способ 3.** Моделирование ригеля двумя параллельно расположенными балочными элементами (оси совпадают с линией опирания полок корпуса ЦНД, а моменты инерции поперечного сечения равны половине соответствующих моментов инерции исходного ригеля) с соединением степеней свободы, соответствующим перемещением в плоскости XOY. Ошибка данного способа состоит в отсутствии связи между балочными элементами по углам поворота и вертикальным перемещениям. Модель приведена на рис. 5.

Для проверки адекватности моделирования ригелей с опиранием нескольких корпусов построена модель, представленная расчетной схемой на рис. 6. Конечно-элементное моделирование ригелей стержнями осуществлено для балок, на которые происходит опирание одного корпуса ЦНД, а для ригелей с опиранием двух корпусов ЦНД моделирование производилось одним из вышеописанных способов.

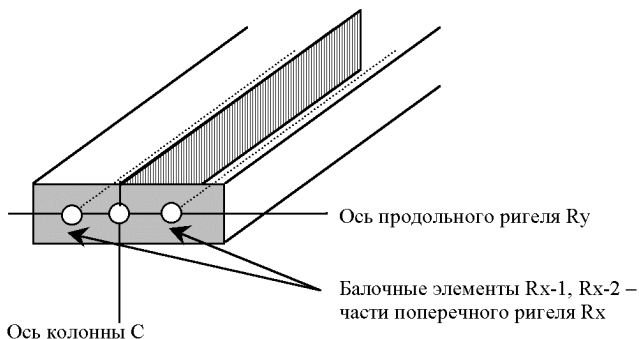


Рисунок 5 – Моделирование ригеля двумя балочными элементами с объединенными степенями свободы

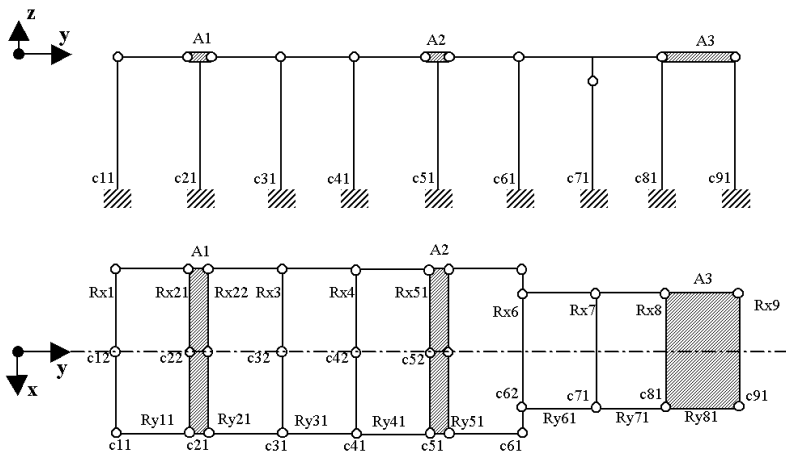


Рисунок 6 – Модель фундамента парового турбоагрегата К-500, в котором 2-й и 5-й поперечные ригели моделировались одним из трех указанных способов

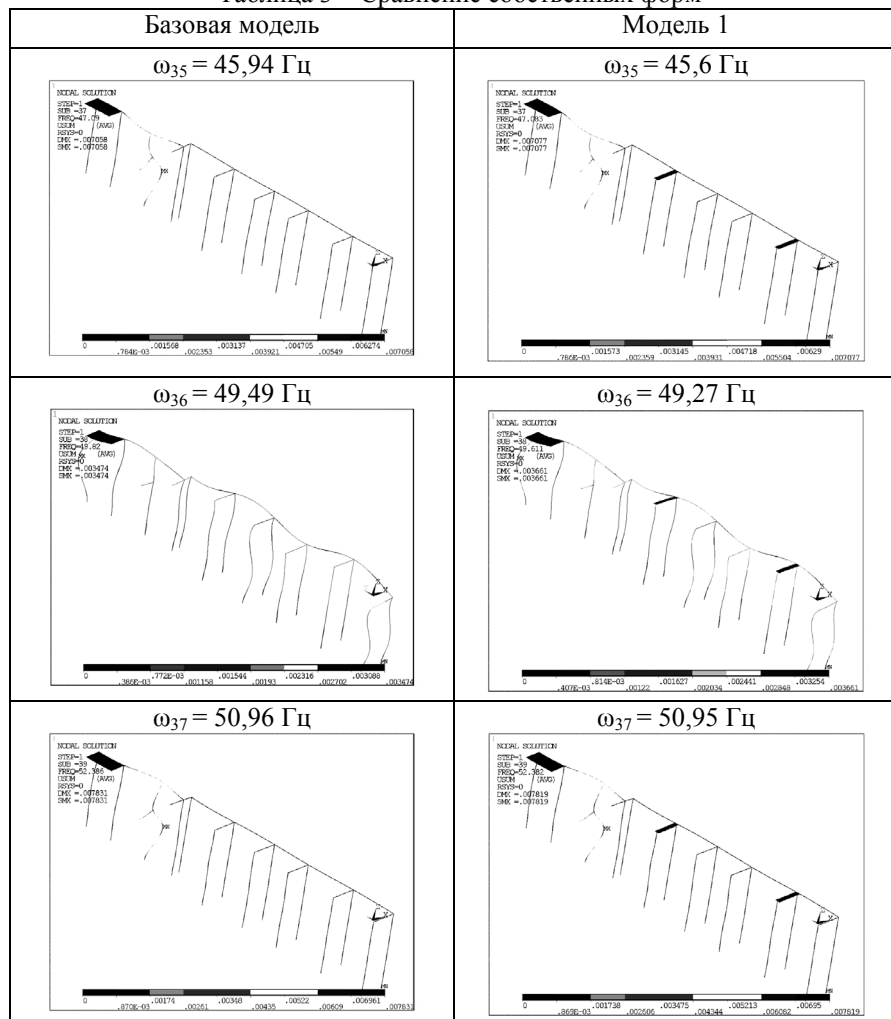
**6. Анализ результатов.** Оценка эффективности моделей 1, 2, 3 по собственным частотам и формам по отношению к базовой приведена в табл. 2 и 3.

Сравнение собственных частот и форм альтернативных моделей с базовой стержневой моделью показывает, что наиболее близкой к ней является модель, полученная первым способом. Для этой модели максимальная относительная погрешность по сравнению с базовой моделью не превышает значение 0,42 % ( $\omega_{16} = 32,78$  Гц). В рабочем диапазоне частот (44...55 Гц) максимальная относительная погрешность не превышает значение 0,34 %, что подтверждает возможность использования данной модели при моделировании системы ТФО.

Таблица 2 – Сравнение собственных частот в диапазоне 30...55 Гц

№	Базовая модель	Модель 1		Модель 2		Модель 3	
	Частота (Гц)	Частота (Гц)	Отн. погр.%	Частота (Гц)	Отн. погр.%	Частота (Гц)	Отн. погр.%
15	32,11	31,83	0,28	31,44	0,67	27,79	4,32
16	32,78	32,36	0,42	31,6	1,18	28,9	3,88
17	33,21	33,11	0,1	31,73	1,48	29,18	4,03
18	33,26	33,15	0,11	32,09	1,17	30,11	3,15
19	33,38	33,35	0,03	32,66	0,72	33,19	0,19
20	33,49	33,39	0,1	33,3	0,19	33,23	0,26
21	33,52	33,55	-0,03	33,31	0,21	33,41	0,11
22	33,54	33,65	-0,11	33,45	0,09	33,47	0,07
23	33,67	33,76	-0,09	33,64	0,03	33,65	0,02
24	34,25	34,25	0	34,26	-0,01	34,25	0
25	34,5	34,49	0,01	34,53	-0,03	34,42	0,08
26	34,89	34,9	-0,01	34,97	-0,08	34,6	0,29
27	35,61	35,45	0,16	35,8	-0,19	34,95	0,66
28	36,36	36,34	0,02	36,38	-0,02	36,09	0,27
29	36,6	36,46	0,14	37,03	-0,43	36,39	0,21
30	38,86	38,7	0,16	39,17	-0,31	38,1	0,76
31	40,76	40,76	0	40,75	0,01	40,76	0
32	41,22	41,18	0,04	41,16	0,06	40,88	0,34
33	43,3	42,96	0,34	41,84	1,46	42,64	0,66
34	44,98	44,97	0,01	44,25	0,73	44,89	0,09
35	45,94	45,6	0,34	44,84	1,1	45,19	0,75
36	49,49	49,27	0,22	45,2	4,29	48,63	0,86
37	50,96	50,95	0,01	48,85	2,11	50,9	0,06
38	54,49	54,23	0,26	50,23	4,26	54,01	0,48
39	55,56	55,23	0,33	51,08	4,48	55,01	0,55

Таблица 3 – Сравнение собственных форм



В табл. 3 представлено сравнение собственных форм для базовой стержневой и альтернативной модели построенной по способу 1 в районе рабочей частоты ротора 50 Гц.

**7. Заключение.** В работе предложены способы моделирования ригеля фундамента комбинацией стержней и пластин, с целью обеспечения двух линий опирания полок корпуса ЦНД на фундамент. Проведенные численные исследования показали возможность такого моделирования и динамическую эквивалентность построенной модели фундамента к базовой стержневой модели.

Это позволяет использовать экономичную (с точки зрения количества степеней свободы) пластинчато-стержневую модель фундамента в системе ТФО при многокорпусном турбоагрегате.

**Список литературы:** 1. Шульженко Н.Г., Воробьев Ю.С. Численный анализ колебаний системы турбоагрегат-фундамент. – К.: Наукова думка, 1991. – 232 с. 2. Степченко А.С. Определение собственных частот и форм фундамента методом синтеза форм // Харьк. политехн. ин-т. Харьков 1993. – 16 с. – Рус. – Деп. в УкрИНТЭИ 01.03.93, №307-Ук93. 3. Жовдак В.А., Красников С.В., Степченко А.С. Исследование динамического взаимодействия турбоагрегата К-325-23.5 с фундаментом // Вестник ХГПУ. – Вып. 53, Динамика и прочность машин. – Харьков, ХГПУ, 1999. – С. 64-69. 4. Жовдак В.А., Красников С.В., Степченко А.С. Исследование влияния конструктивных параметров на динамические характеристики системы турбоагрегат-фундамент // Вестник ХГПУ. Вып. 100. – Харьков, ХГПУ, 2000. – С. 66-69.

*Поступила в редколлегию 04.06.2008.*

УДК 539.3

**Б.Ф.ЗАЙЦЕВ**, докт.техн.наук; **А.В.АСАЕНКО**, канд.техн.наук;  
**Н.Е.ЕРЕЦКАЯ**, аспирант; ИПМаш НАН Украины, Харьков

### **ТРЕХМЕРНЫЙ МКЭ В РАСЧЕТАХ КОЛЕБАНИЙ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ТЕЛА**

Побудовані рівняння коливань тіла, що обертається. Застосовано метод скінченних елементів в рухомій разом з тілом системі координат. Досліджено структуру матриць в рівняннях та окремі випадки виродження рівнянь.

The equations of vibrations of a rotating body are developed. The finite element method in the coordinate system which is moving together with a body is used. The matrix structures into the equations and particular cases of degeneracy of the equations are considered.

**Введение.** Практические представления о вращающихся элементах или узлах машин обычно связываются с валами передаточных механизмов или роторами энергомашин. Колебания валов (роторов) являются значительной проблемой машиностроения, которая во многом уже исследована и решена. Исследования в области динамики валов имеет большую историю и огромное число публикаций, в которых основополагающее место занимают работы Ф.М. Диментберга [1]. Из проблем динамики валов следует отметить задачи определения критических частот; установившихся и неустойчивых колебаний, связанных с переходом через критические частоты; автоколебаний; влияния характеристик упруговязких опор и сил внешнего и внутреннего трения на колебания, а также задачи колебания валов с дефектами и выявление этих дефектов по изменившимся вибрационным характеристикам, относящиеся к вибрационной диагностике. Преимущественно при теоретических исследованиях использованы стержневые модели, во многих случаях достаточно адекватные реальным конструкциям и поставленным исследовательским задачам.

В последнее время задачам вибрационной диагностики поврежденных роторов уделяется значительное внимание, что вызвало значительный поток публикаций по